

Studio di processi di produzione centrale e esclusiva mediante collisioni pp ad energia $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ con l'esperimento CMS

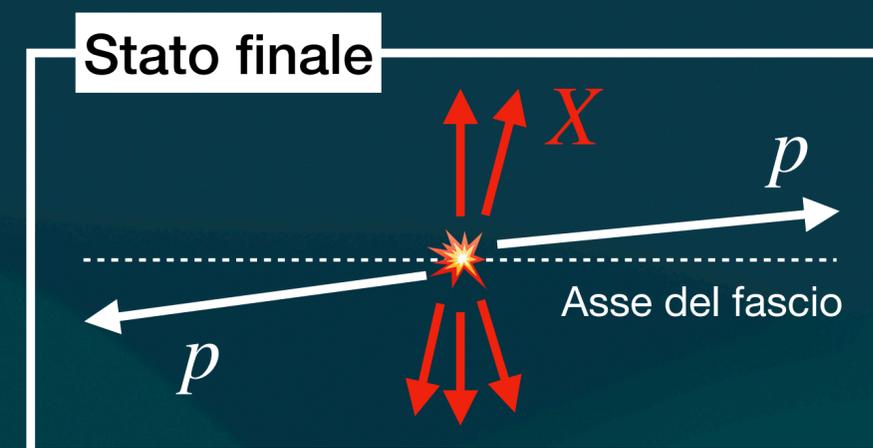
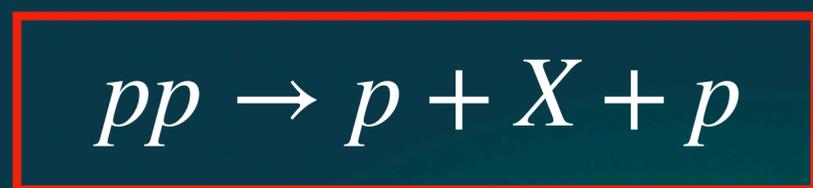


Matteo Pisano - IFEA, incontri di fisica delle alte energie, Catania, 12-14 Aprile 2023

Che cos'è un processo di **produzione centrale e esclusiva**?

Non tutti gli urti dissociano i protoni...

- In un processo di **produzione centrale esclusiva (CEP)**, i protoni incidenti si scambiano energia ma **rimangono intatti** durante l'urto:



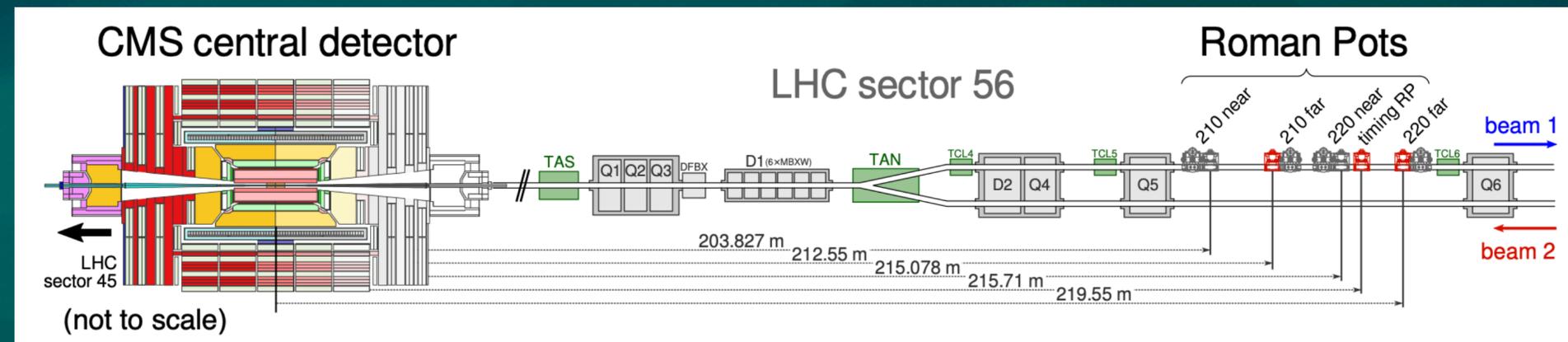
- Durante l'interazione, i **protoni perdono energia** e **risultano deviati** dalla direzione originale;
- L'energia persa è utilizzata per creare un sistema di particelle, denotato con X .

PPS: il “Precision Proton Spectrometer”

- Lo stato finale prodotto è caratterizzato da una forte dicotomia:
 - Il sistema di particelle X è prodotto in un intervallo di pseudo-rapidità che può essere rivelato dal rivelatore centrale di CMS ($|\eta| < 2.4$);
 - I protoni sono deflessi ad angoli $\sim 3^\circ$ rispetto al fascio, e sfuggono al rivelatore centrale.
- PPS è un rivelatore di particelle costruito con lo scopo di selezionare oggetti prodotti ad alto η :
 - E' simmetrico rispetto al punto di interazione (IP), ed è costituito da 6 differenti rivelatori (3 per lato):
 - 2 “tracking stations” per lato: permettono di ricostruire la frazione di momento persa (ξ) dai protoni durante l'interazione;
 - 1 “timing station” per lato: permette di correlare i protoni osservati da PPS con il sistema X osservato nel rivelatore centrale.

$$\xi = \frac{p_i - p_f}{p_i}$$

Posizione reciproca di PPS rispetto al sistema centrale



Sistema centrale di CMS

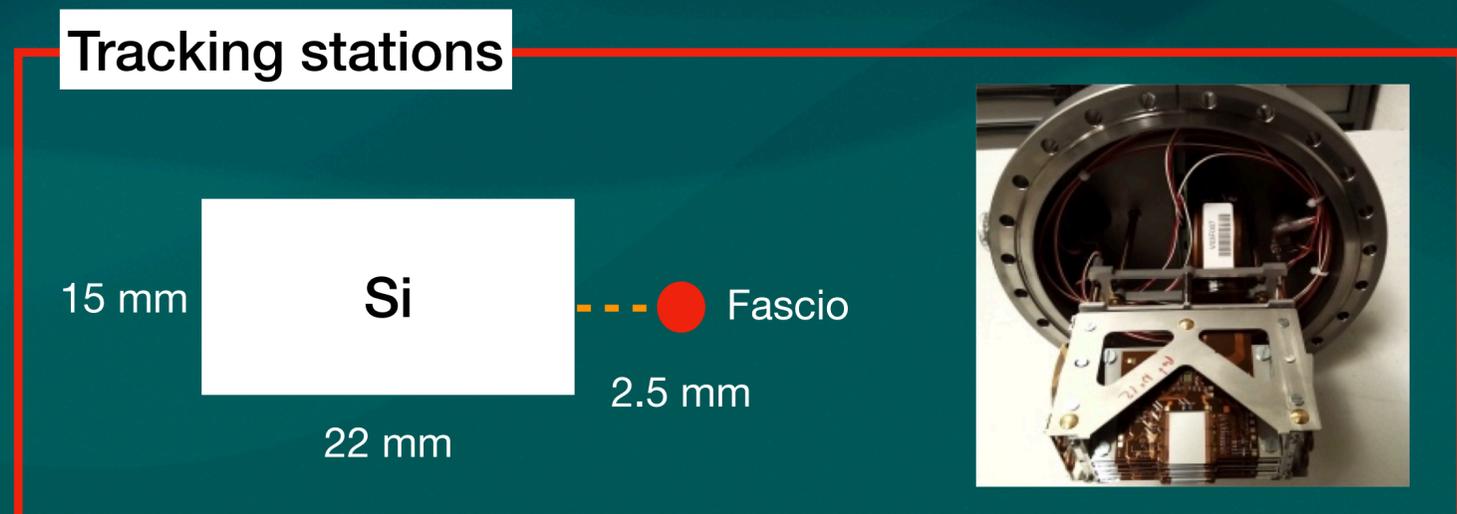
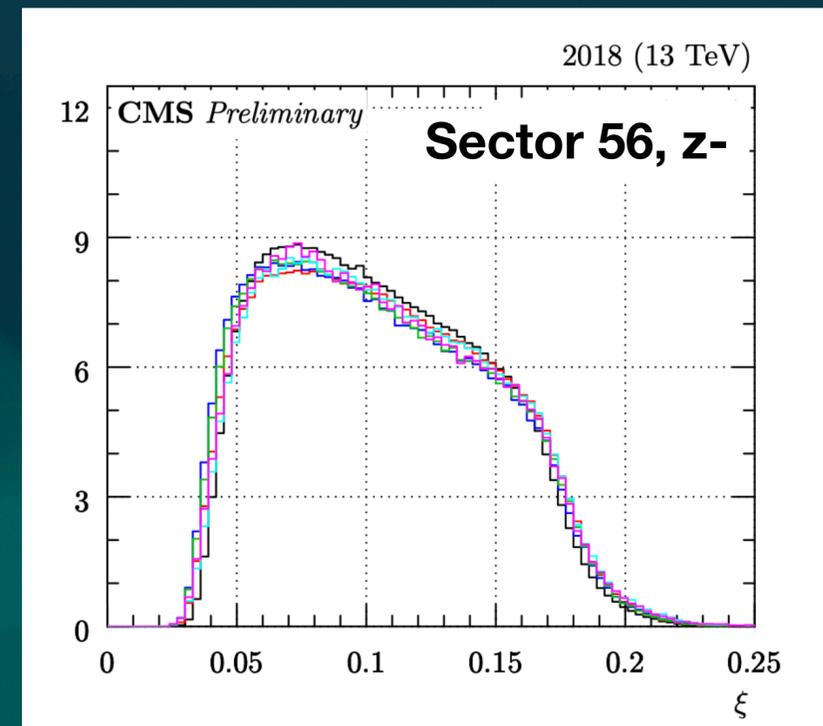
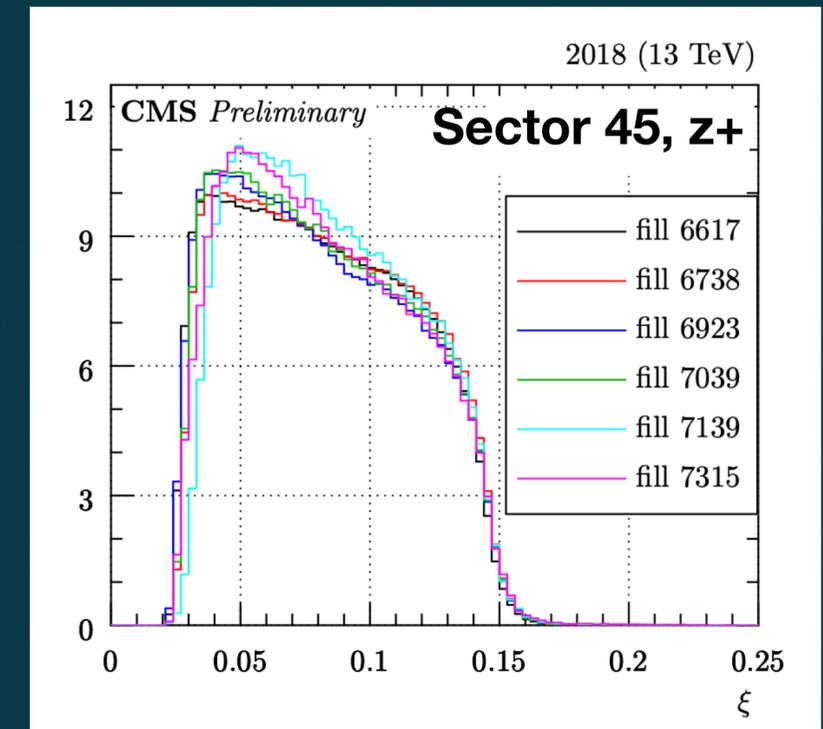


PPS



PPS: il “Precision Proton Spectrometer”

- La risoluzione temporale durante Run2 è limitata → non sarà usata nelle analisi che presenterò
- Le “tracking stations” si trovano ad una distanza di circa 200 m dal IP, e ad una distanza di 2.5 mm dal fascio
- Trattasi di rivelatori in silicio e dimensione efficace (15 x 22) mm circa
- Ciò permette di selezionare protoni ad angoli di deflessione estremamente piccoli ($\sim 3^\circ$)
- In accordo con [CMS-PAS-PRO-21-001](#), PPS riesce a rivelare con buona efficienza i protoni con $\xi \in [0.05, 0.15]$



La relazione tra **PPS** e il **sistema centrale**

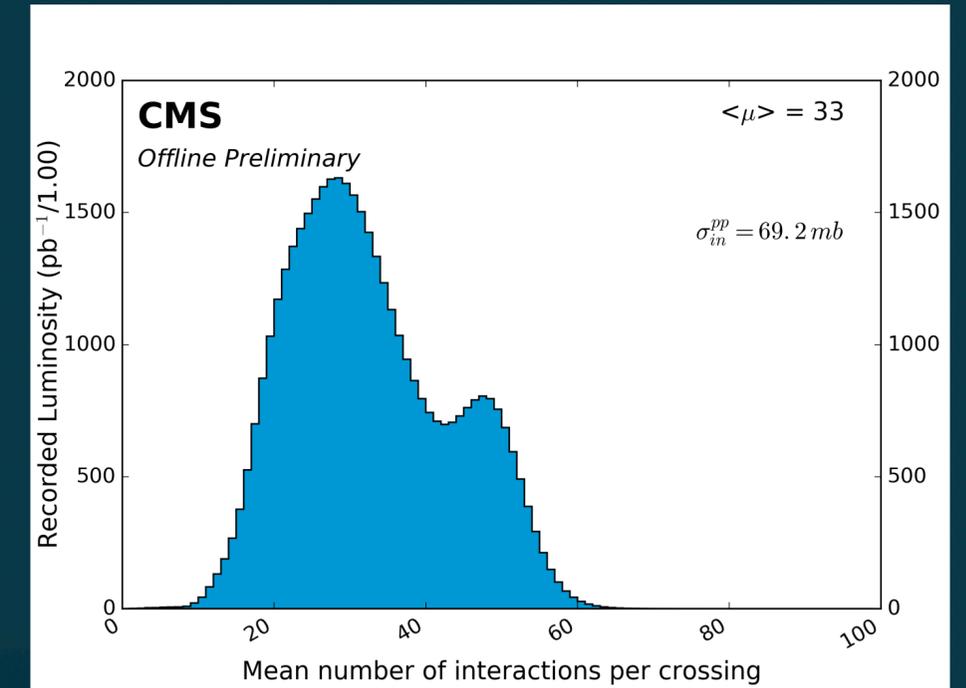
- Mediante la cinematica relativistica è possibile mostrare che **la massa invariante del sistema centrale** (M_X) e la **rapidità del sistema centrale** (Y_X) sono relazionate alla **frazione di momento perso dai protoni** (ξ_1, ξ_2):

$$M_X = \sqrt{s\xi_1\xi_2} \quad Y_X = \frac{1}{2} \ln \frac{\xi_1}{\xi_2}$$

- Il vincolo $\xi \in [0.05, 0.15]$ si riflette dunque su un vincolo sulla massa invariante:
 - $M_X \in [300, 2000]$ GeV
- Ciò rende PPS **estremamente sensibile a scenari BSM**, caratterizzati da alta energia.

Il “pile-up” di protoni: eventi simultanei

- Ad LHC, i protoni non sono fatti collidere uno ad uno, bensì **in pacchetti**
- Nelle condizioni di Run2, si osservavano circa **33 interazioni simultanee** (nella stessa interazione)
- Questo complica la selezione degli eventi:
 - In principio, un evento esclusivo dovrebbe essere caratterizzato da protoni in PPS, mentre **un qualunque altro fondo** (ad esempio, un Drell Yan: $pp \rightarrow l^+l^-$) **dovrebbe esserne privo**
 - La presenza di eventi simultanei non garantisce assenza di protoni per gli eventi non esclusivi (Pile-up)
- Utilizzando le relazioni $M_X = \sqrt{s\xi_1\xi_2}$ e $Y_X = \frac{1}{2} \ln \frac{\xi_1}{\xi_2}$, possiamo stabilire una relazione tra il sistema centrale (X) e i protoni in avanti
- Osservazione: M_X e Y_X possono essere calcolati indipendentemente a partire dalle quantità del sistema centrale.



Numero di pile up

Produzione esclusiva di coppie $t\bar{t}$

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

CMS PAS TOP-21-007

- In questa analisi il sistema X è rappresentato da una coppia $t\bar{t}$:

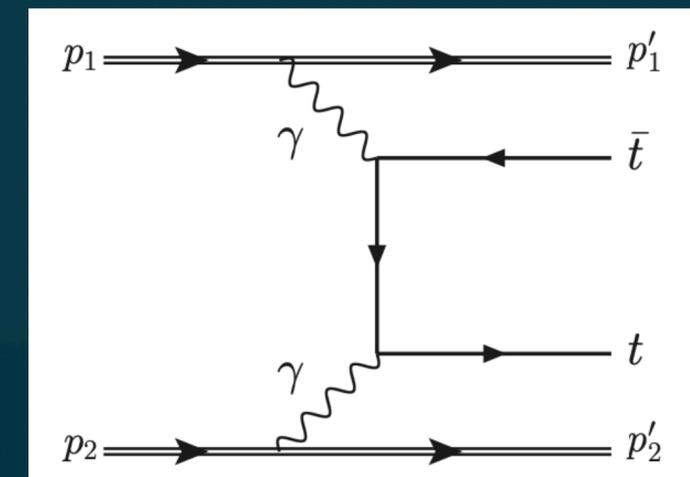
$$pp \rightarrow p + \underline{t\bar{t}} + p$$

Possibili decadimenti della coppia $t\bar{t}$

$$t\bar{t} \rightarrow bl_1\nu_1 + \bar{b}l_2\nu_2 \quad \checkmark$$

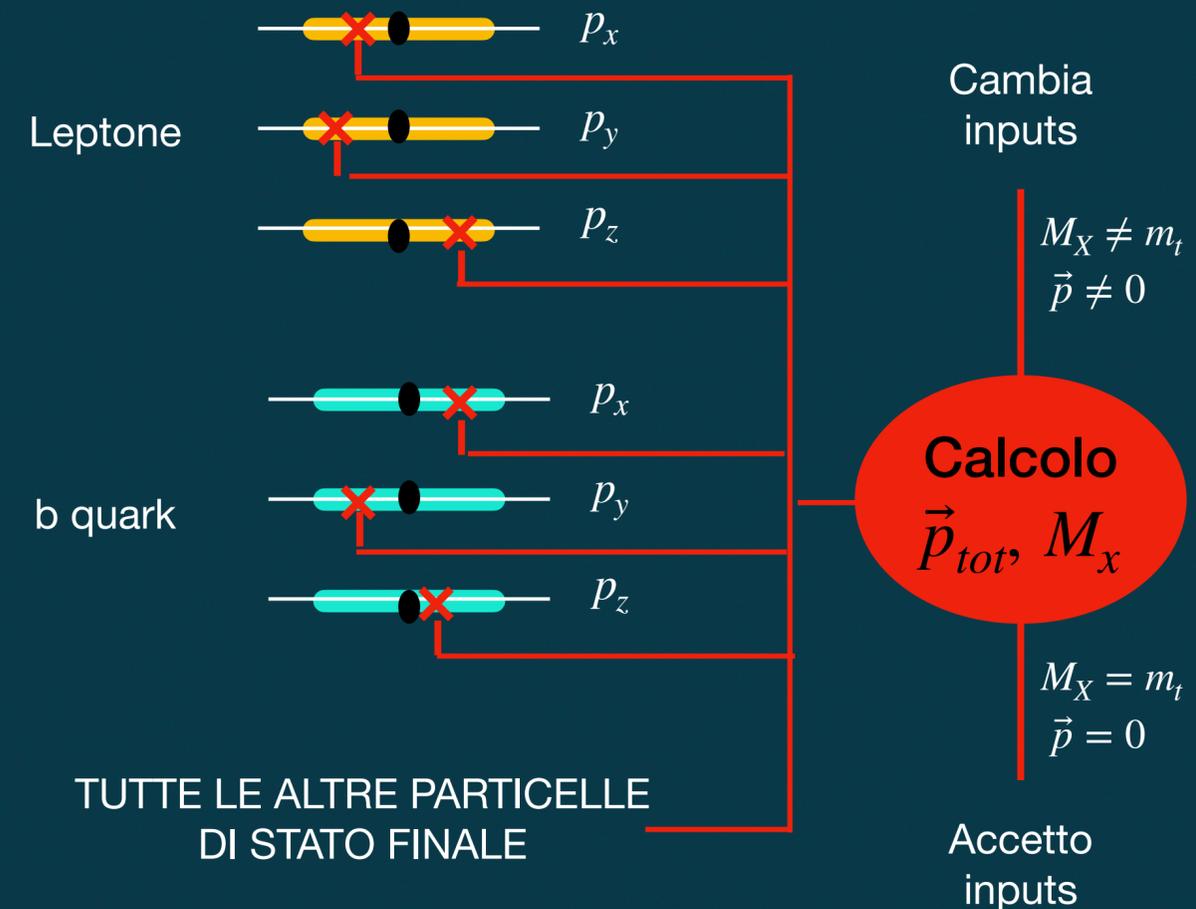
$$t\bar{t} \rightarrow bq\bar{q}' + \bar{b}l\nu \quad \checkmark$$

$$t\bar{t} \rightarrow bq_1\bar{q}'_1 + \bar{b}q_2\bar{q}'_2 \quad \times$$

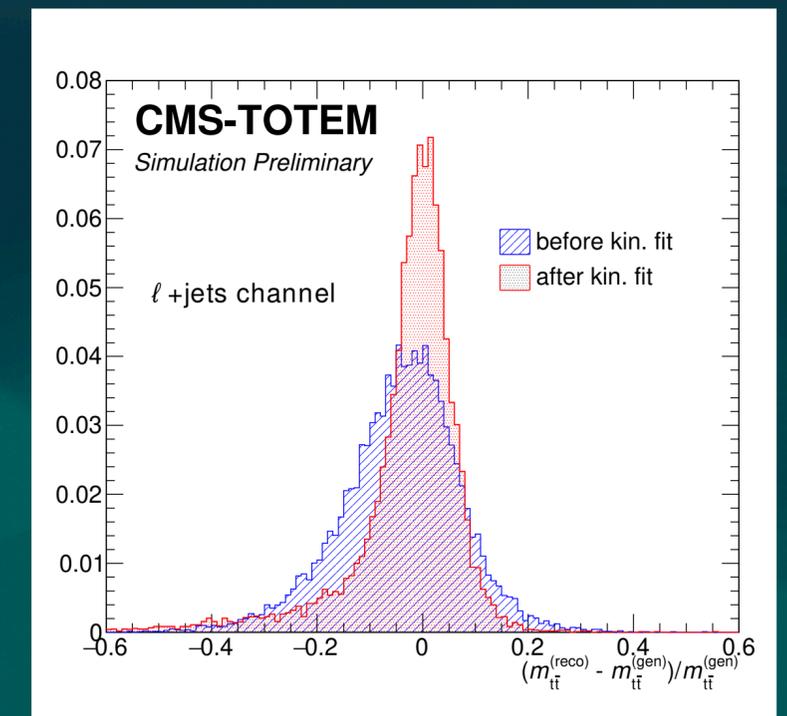


- Ad oggi è l'unico articolo che studia questo processo;
- L'articolo stabilisce un limite sulla sezione d'urto del processo.

- La principale difficoltà dell'analisi è data dalla presenza di **sei particelle nello stato finale**
- Ricostruendo le **variabili del sistema centrale** (M_X, Y_X), queste **soffrono di grande incertezza** (somma delle incertezze delle singole quantità)
- L'idea chiave che ha permesso di migliorare la risoluzione delle variabili dello stato finale è applicare un **fit cinematico**
 - Si **considerino le componenti x,y,z del momento di ogni particella** nello stato finale
 - Le componenti **vengono fatte variare** entro il loro errore sperimentale **finché non soddisfino** i vincoli cinematici (**conservazione energia e momento**)
 - Questo metodo **migliora la risoluzione** di M_X, Y_X (**la deviazione standard della distribuzione è dimezzata**)



Effetto del fit

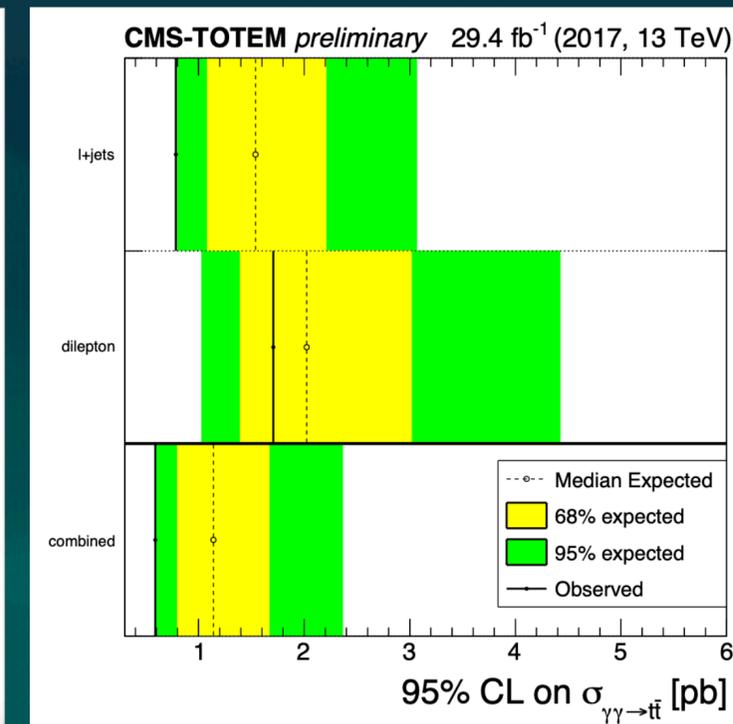
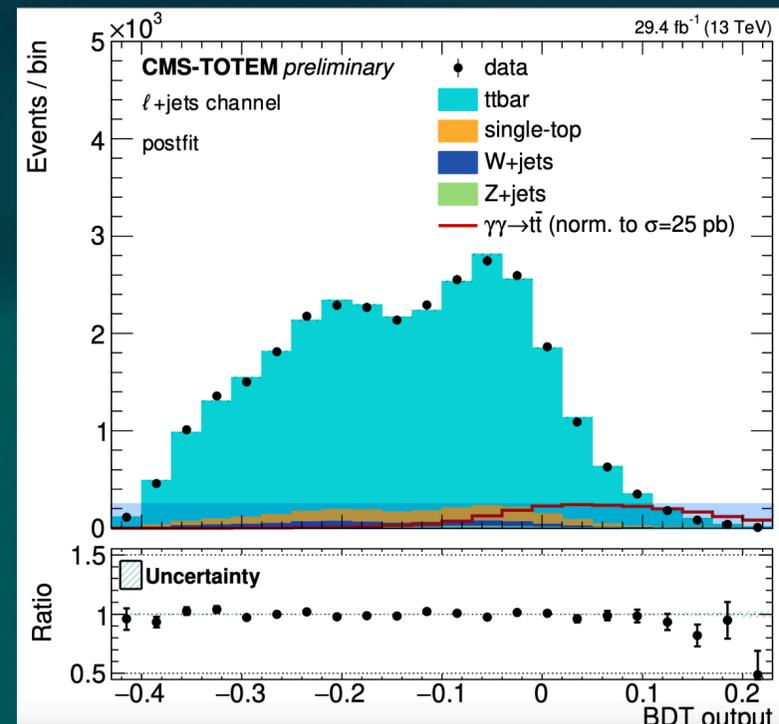
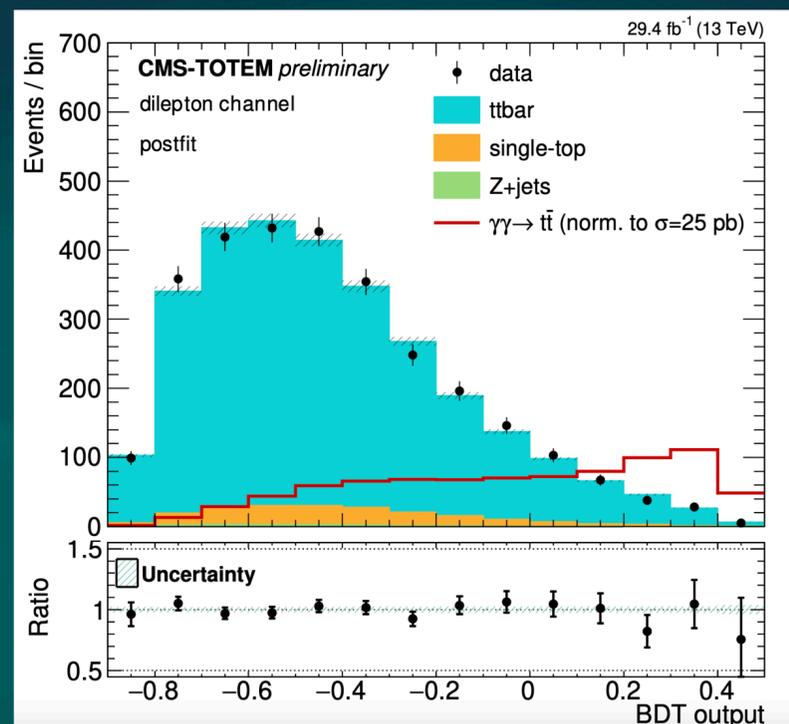


Produzione esclusiva di coppie $t\bar{t}$

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

CMS PAS TOP-21-007

- Successivamente un'analisi con variabili multiple (MVA) permette di separare ulteriormente il segnale dal fondo
- Il classificatore usato è il **BDT** che permette di stabilire un limite superiore di $\sigma < 0.59 \text{ pb}$, essendo il valore teorico $O(0.1 \text{ fb})$.



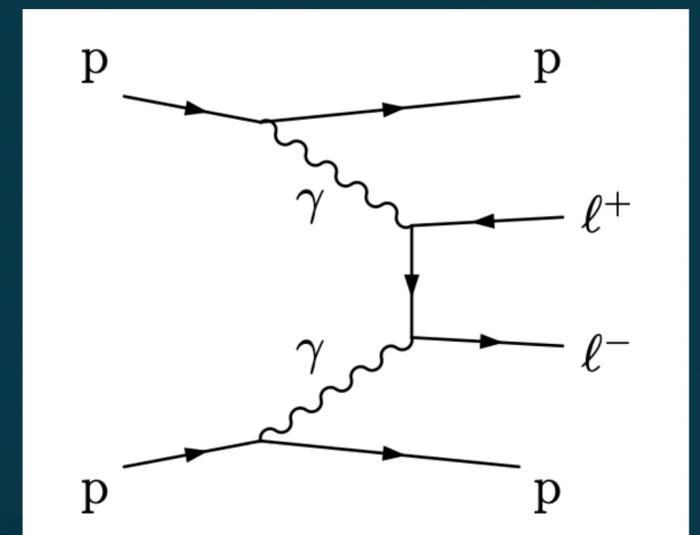
Produzione (semi)-esclusiva di coppie $e^+e^-/\mu^+\mu^-$

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

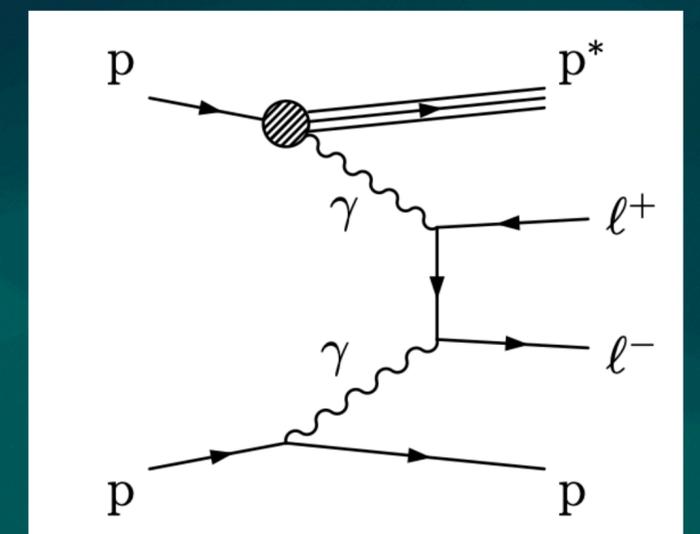
JHEP 07 (2018) 153

- Lo studio dei fenomeni esclusivi necessita di **alti valori di M_X** , questo è dovuto all'**accettanza di PPS**;
- Questo implica che, spesso, **non si riesca a osservare** un processo esclusivo, come nel caso del $t\bar{t}$;
- CMS PPS 17-001, ricerca **processi semi-esclusivi**, ovvero caratterizzati da un solo protone in stato finale.
- In particolare si concentra sulla ricerca di produzione di coppia e^+e^- , $\mu^+\mu^-$

Processo Esclusivo



Processo Semi-esclusivo

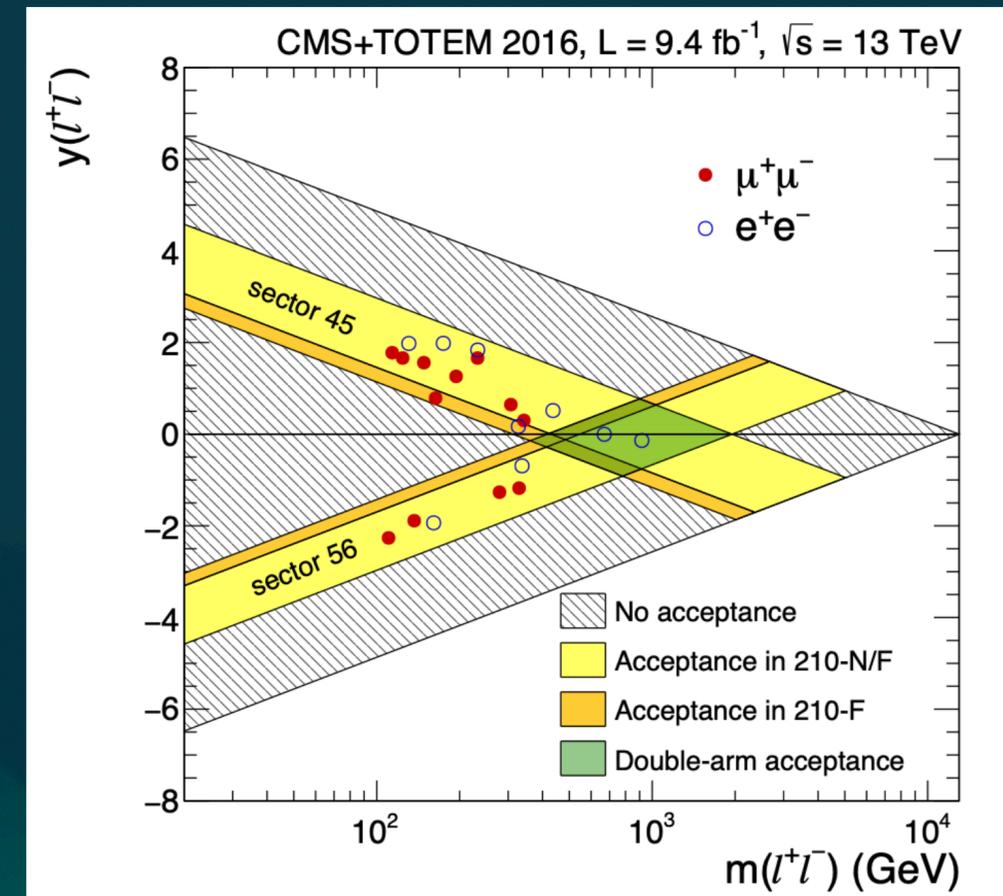


Produzione centrale e (semi)esclusiva di coppie $e^+e^-/\mu^+\mu^-$

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

- La richiesta di appena un protone nello stato finale diminuisce la soglia in M_X a 100 GeV, che per due protoni era 300 GeV.
- In questo modo è possibile osservare:
 - 8 coppie e^+e^- (6 semi-esclusive + 2 esclusive);
 - 12 coppie $\mu^+\mu^-$;
- É da sottolineare che, in generale, la richiesta di un solo protone aumenta la presenza di fondi.

JHEP 07 (2018) 153

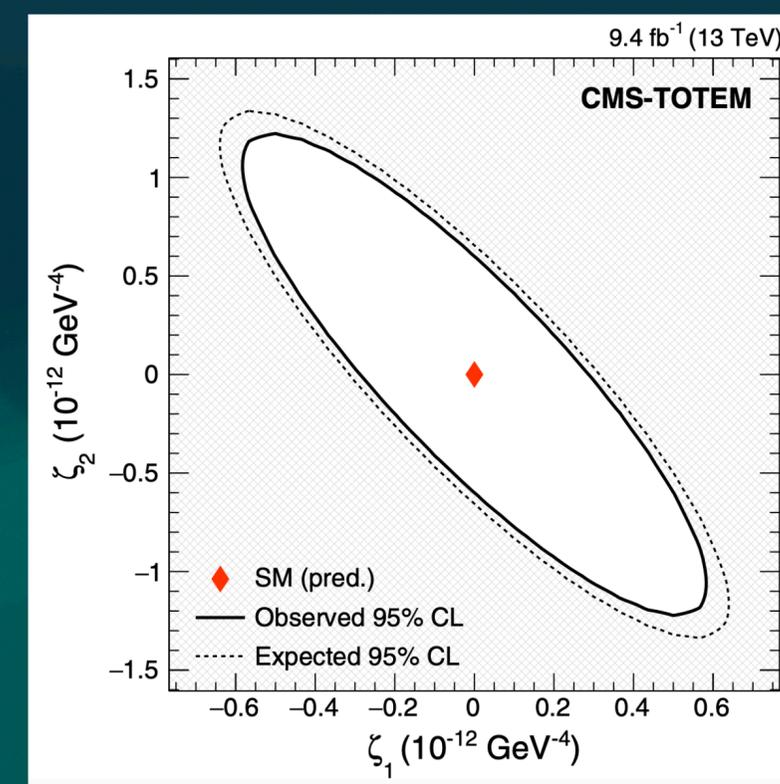
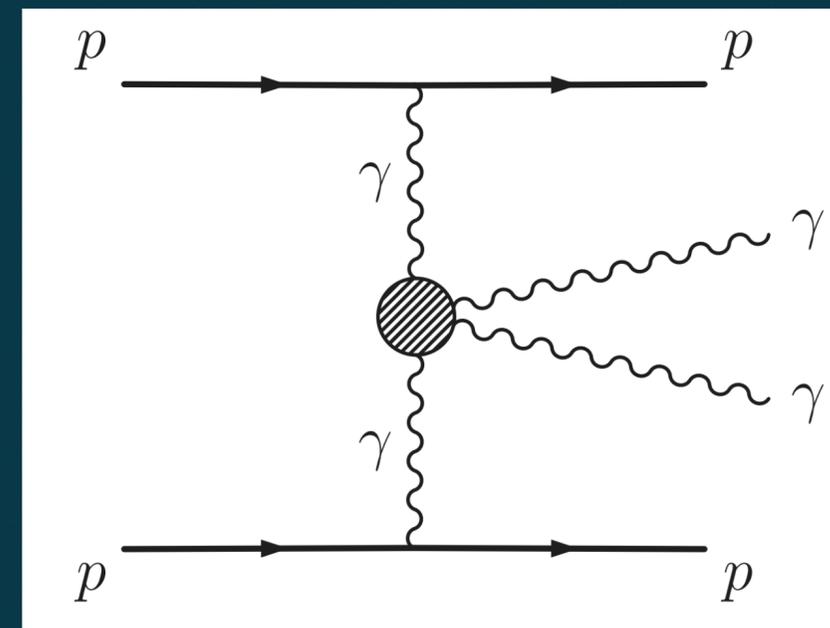


Produzione esclusiva di coppie $\gamma\gamma$

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

PHYSICAL REVIEW
LETTERS 129, 011801
(2022)

- I fenomeni di produzione esclusiva permettono anche di stabilire limiti sull'accoppiamento (“**coupling**”) di processi rari.
- Un esempio è la produzione $pp \rightarrow p + \gamma\gamma + p$
- Tale processo **non è previsto dalla teoria classica** dell'elettrodinamica:
 - non è previsto un termine di accoppiamento a 4 fotoni!
- E' però possibile che **fotoni altamente energetici** producano **coppie di particelle da carica opposta**
- Queste possono poi interagire tra loro, generando una coppia di fotoni.
- L'interazione $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ mediata da un loop di particelle-anti/particelle cariche è detta LBL (“**light-by-light**”);
- Questa analisi ha permesso di **determinare limiti stringenti sui valori dei coupling** ζ_1, ζ_2 che descrivono l'interazione, come mostrato nel plot a fianco.



Conclusioni

Verso nuova fisica!

- **PPS** è un poderoso strumento per **studiare fisica oltre il modello standard**:
 - Avendo una buona accettazione per eventi con due protoni in avanti ($300 \text{ GeV} < M_X < 2000 \text{ GeV}$), PPS permette di studiare scenari BSM energetici riducendo il fondo
 - Richiedendo la presenza di un unico protone, si può allargare l'accettazione ($M_X > 100 \text{ GeV}$), a costo di un fondo più elevato
- **Ad oggi**, abbiamo studiato la produzione centrale e (semi)esclusiva di coppie e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $t\bar{t}$, WW , ZZ e $\gamma\gamma$
- Ciò ha permesso di fissare limiti sulla sezione d'urto di processi rari mai studiati fino ad ora

BACKUP

Produzione esclusiva di bosoni W^+W^- e ZZ

Risultati notevoli nella collaborazione CMS

Submitted to the Journal of High Energy Physics

- Trattasi di uno studio recente che ha permesso di stabilire un limite superiore su σ :
 - $\sigma_{WW} < 67 \text{ fb}$ (95% CL);
 - $\sigma_{ZZ} < 43 \text{ fb}$ (95% CL).
- Il valore teorico atteso è 50 fb per la produzione di coppie WW, mentre è 0.05 fb per la produzione ZZ.
- Anche in questo caso, è stato possibile fornire un limite stringente sul coupling $\gamma\gamma WW$ e $\gamma\gamma ZZ$

